第 46 卷 第 8 期
2023 年 8 月

核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn

Vol.46，No.8
August 2023

中子皮结构及其在核反应中的效应

方德清

（教育部核物理与离子束应用重点实验室 复旦大学现代物理研究所 上海 200433）

摘要 中子皮是不稳定原子核中存在的一种奇特结构，在核反应过程中会产生各种效应。不同理论模型研究发现，中子皮厚度会影响核-核碰撞中的中子擦去截面、轻粒子产额比、重碎片产额比、光子产生截面等物理量，也与原子核的集团结构、表面宽度、温度等存在密切关系。在高能重离子碰撞中研究发现，中子皮同样存在明确的效应。实验上，基于放射性核束装置可以产生具有中子皮结构的不稳定核，通过测量其与稳定核发生反应后与中子皮敏感的观测量，能提取或确定中子皮厚度。结合核理论模型，可以进一步约束非对称核物质的状态方程及核天体的相关性质。

关键词 中子皮，放射性核束，非对称核物质的状态方程

中图分类号 O571.2，O571.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080016

关联视频 DOI: 10.12351/ks.2208.0194



Neutron skin thickness and its effects in nuclear reactions

FANG Deqing

(*Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application* (*MOE*), *Institute of Modern Physics*, *Fudan University*, *Shanghai 200433*, *China*)

Abstract The physics of radioactive nuclear beams is one of the frontiers of nuclear physics. New phenomena and physics appear in exotic nuclei far from the β-stability line. The neutron skin is an exotic phenomena in unstable nuclei and is closely correlated with the properties of the equation of state (EOS) of asymmetric nuclear matter and neutron stars. This study sought to examine previous studies on the effect of the neutron skin on nuclei-nuclei collisions to identify good observables for determining the neutron skin thickness, which could in turn be used to investigate the EOS of asymmetric nuclear matter. Various theoretical models are used to study the effect of neutron skin in nuclei-nuclei collisions. The statistical abrasion-ablation (SAA) and isospin-dependent quantum molecular dynamics (IQMD) models are used to study the neutron abrasion cross-section, neutron/proton ratio, and t/^{3}He ratios. A nuclear structure model is used to investigate the relation between the neutron skin and α-cluster formation, α decay, nuclear surface, and nuclear temperature. Strong correlations have been found between the neutron skin thickness and neutron abrasion cross-section, neutron/proton ratio, and t/^{3}He ratios, photo production, and other quantities. By measuring quantities that have a strong correlation with the neutron skin, the skin thickness can be obtained. The EOS of asymmetric nuclear matter and properties of neutron stars can be studied or constrained by using the obtained neutron skin data. Further investigations are necessary for determining observables that are useful

国家重点研发计划(No.2018YFA0404404)、国家自然科学基金(No.11925502, No.11935001, No.11961141003, No.11927901, No.12147101)、中国科学院战略性先导科技专项(B类) (No.XDB34030100)资助

第一作者：方德清，男，1974年出生，2001年于中国科学院上海原子核研究所获博士学位，研究领域为核物理，E-mail：dqfang@fudan.edu.cn

收稿日期：2023-02-25，修回日期：2023-04-06

Supported by the National Key R&D Program of China (No.2018YFA0404404), National Natural Science Foundation of China (No.11925502, No. 11935001, No. 11961141003, No. 11927901, No. 12147101), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDB34030100)

First author: FANG Deqing, male, born in 1974, graduated from Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2001, focusing on nuclear physics, E-mail: dqfang@fudan.edu.cn

Received date: 2023-02-25, revised date: 2023-04-06

for determining the neutron skin thickness from experimental measurements.

Key words Neutron skin, Radioactive nuclear beam, Equation of state of asymmetric nuclear matter

原子核是物质微观结构的重要层次之一。自然界存在的稳定核数量大概是300个，理论预言可能存在的数量有8 000~10 000，到目前为止实验上已发现3 000多个。传统核物理通过对稳定核的大量研究建立了比较完整的理论。例如核半径正比于核子数（A）的三分之一次方，核子按壳模型算出的能级轨道由低到高分布。但是随着实验上发现越来越多的不稳定核，发现其性质与稳定核有很大区别，出现了很多新现象和新物理[1-4]。例如中子晕、中子皮结构；壳模型预言的壳结构，在远离稳定线时会变化，传统的幻数消失并出现新的幻数；极端丰质子核有奇异的放射性模式；以及出现多核子集团结构等现象。

中子皮是原子核的中子半径与质子半径之差。由于质子带电，通过电子、质子散射等多种探测方法，能够对质子分布半径进行非常精确地测量。但是，对于中子的分布半径，实验上没有很好的测量方法，目前中子半径的测量精度与质子半径相比要差很多[2]。

核物质的能量可以用体系的密度与不对称度表示，这就是核物质的状态方程（Equation of State，EOS）。EOS可以展开成对称核物质的和非对称核物质的。对于对称核物质的状态方程，已经有深入和系统的研究，对其性质的了解比较清楚。对于非对称核物质的状态方程，理论上由于不同的核力或相互作用势可以得到不同的对称能与密度依赖关系，可以是软的或硬的，不确定性很大。目前，非对称核物质状态方程是核物理的一个重要研究课题[5-8]。

理论研究发现，非对称核物质状态方程中的一些参数（如对称能、对称能的斜率等）与原子核的中子皮厚度存在非常明确的依赖关系。如果中子皮的大小能够精确测量，就可以通过它来确定或约束对称能等参数。另外，中子星主要由中子物质构成，其结构与非对称核物质状态方程存在非常密切的关系，不同的相互作用势或理论会给出不同的中子星质量半径关系[9-10]。因此，如果能精确知道原子核的中子皮，也能对中子星的具体性质进行约束。

1 中子皮在核反应中的效应

存在中子皮结构的原子核，其中子的密度分布半径比质子的大，在核反应中会产生与稳定核不同的各种效应；同时，与稳定原子核相比，其结构特性也会不一样。下面通过核反应中的一些物理量或一些核结构特征来讨论中子皮的具体效应，主要有中子皮与中子擦去截面、中子皮与轻粒子产额比、中子皮与弹核碎裂反应、中子皮与光子的产生、中子皮与集团结构、中子皮与核表面大小、中子皮与核温度的依赖关系以及高能重离子碰撞中的中子皮效应。

1.1 中子皮与中子擦去截面的关系

统计擦碎模型是一个比较成功的唯相核反应模型，能对核反应截面及弹核碎裂反应的产额进行计算。文献[11-12]基于该模型研究了中子擦去截面与中子皮的依赖关系。中子擦去截面是指所有质子数与炮弹相同的碎片产生截面之和。研究发现中子擦去截面与中子皮厚度存在明显的正比关系。用类似方法，也可以得到质子擦去截面，对应的是指所有中子数与炮弹相同的碎片产生截面之和。结果表明，质子擦去截面与中子皮成反比，中子皮越厚，质子擦去截面越小，如图1所示[12]。因此，实验测量中子擦去截面可以提取炮弹核的中子皮大小。如果把中子/质子擦去截面做一个比值，从实验的角度能够消除测量的系统误差，提高中子皮的精度。这个比值与中子皮厚度存在非常好的线性关系。文献[13]通过理论计算研究了锡同位素的中子皮与中子擦去截面的关系，也发现中子擦去截面是敏感于中子皮厚度的物理量，可以通过实验测量来约束对称能等物理量。

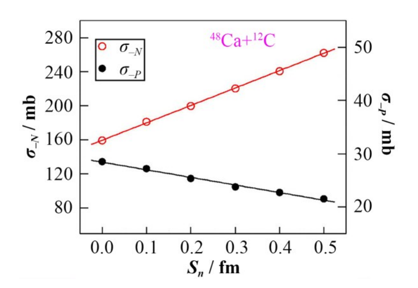


图1 50 A MeV ^{48}Ca+^{12}C反应的中子擦去截面、质子擦去截面与中子皮厚度的依赖关系[12]

Fig.1 Dependence between the neutron removal cross-section, proton removal cross-section, and neutron skin thickness for the reactions of 50 A MeV ^{48}Ca+^{12}C[12]

1.2 中子皮与轻粒子产额比的关系

文献[14-15]基于同位旋依赖的量子分子动力学（Isospin dependent Quantum Molecular Dynamics，IQMD）模型研究了中子皮与轻粒子产额比的关系。通过研究^{50}Ca轰击Be靶反应中出射的中子和质子

产额比，发现从中心到周边反应，其与中子皮厚度都呈现正比关系。特别是在周边反应中，线性依赖非常明确。因此，实验上可以通过测量质子与中子的比值来提取中子皮厚度。由于实验测量中子比较困难，进一步研究了更重的带电粒子，氚(t)和^{3}He，这两个核去掉相同的核子后，最后的差别是1个中子和质子。研究发现，氚和^{3}He的产额比与中子-质子产额比基本成正比关系，如图2所示[15]。将氚和^{3}He产额比再比上中子-质子产额比，得到在不同中子皮厚度下基本为一个常数。因此，实验上不管是测量中子-质子比，还是测氚和^{3}He比，都可以提取中子皮厚度，但氚和^{3}He都是带电粒子，更容易测量，可以得到更高精度的实验结果。

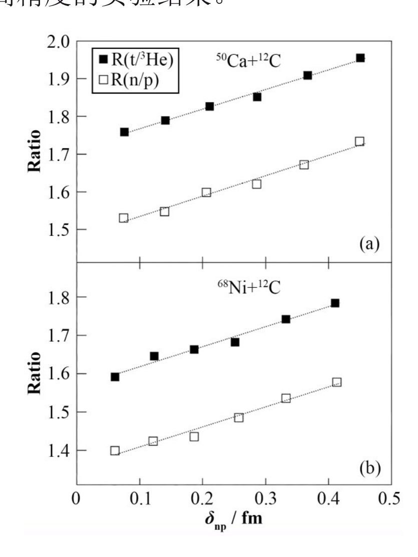


图2 50 A MeV ^{50}Ca+^{12}C (a)和50 A MeV ^{68}Ni+^{12}C (b)周边反应中的中子/质子产额比、氚(t)/^{3}He产额比与中子皮厚度的依赖关系[15]

Fig.2 Dependence between n/p, t/^{3}He, and neutron skin thickness for the reactions of 50 A MeV ^{50}Ca+^{12}C (a) and 50 A MeV ^{68}Ni+^{12}C (b)[15]

1.3 中子皮在弹核碎裂反应中的影响

在核反应中，除了产生轻粒子，也会产生重碎片。对于弹核碎裂反应中的重碎片产生已经有很多研究，如同位旋标度现象，即两个同位旋不同的碰撞系统的同位素产额在对数坐标下呈线性关系。同位旋标度斜率对于轻粒子来说是一个基本不变的常数，并与对称能存在正比关系。因此可以通过同位旋标度参数提取对称能。在弹核碎裂反应中，除了轻碎片具有同位旋标度，重碎片也发现有类似的同位旋标度现象。

文献[16]在IQMD模型中通过改变炮弹的中子皮大小，研究了中子皮对弹核碎裂反应同位旋标度现象的影响，发现中子皮厚度不一样，同位旋标度参数会变化，并且与中子皮厚度存在反关联。这表明可以通过实验测量碎裂反应中重碎片的同位旋标度参数，来提取出中子皮厚度的大小，并进一步通过得到的中子皮约束核物质的状态方程及其重要参数。

文献[17]也研究了碎裂反应中不同的观测量，包括中子擦碎截面、电荷改变截面及相互作用截面，发现这些物理量都与中子皮厚度存在依赖关系，表明通过这些观察量有可能对核物质状态方程以及中子星的性质进行约束。其中，电荷改变截面与中子皮厚度的依赖如图3所示[17]。此外，也有研究发现碎裂反应碎片产生截面的信息熵相关观测量与中子皮厚度存在明显依赖[18-19]。

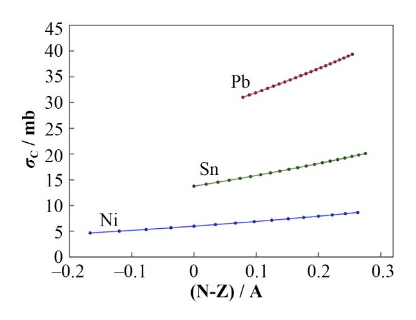


图3 电荷改变截面与中子皮厚度的依赖关系[17]

Fig.3 Dependence between charge-changing cross-section and neutron skin thickness[17]

1.4 中子皮与光子产生的关系

文献[20]基于IQMD模型计算了^{50}Ca+^{12}C与^{50}Ca+^{40}Ca反应产生的直接光子产额比，研究了中子皮厚度对光子产生的效应。发现中心碰撞与周边碰撞的产额比(R_{cp})与中子皮厚度存在比较明显的依赖关系，并与入射能量有依赖，特别是在能量高的时候，线性关系会更好。同时，中子皮厚度对R_{cp}与快度的依赖关系有较大的影响。对于^{40}Ca靶，差别最大的地方在零快度；对于^{12}C靶，类靶快度处的差别更大。要通过光子产额提取中子皮厚度，还需更深入的理论研究。但由于光子与前面研究的一些物理量相比，是一个更干净的探针，有可能在实验上成为较理想的观测量。

1.5 中子皮与核结构特性的关系

文献[21]研究了从^{12}C到^{18}C中子皮厚度不一样的碳同位素，发现中子皮的大小会影响核内形成α集团结构的概率，类似现象在锡同位素里面也同样发现存在。在重核的α衰变中，文献[22−23]发现子核的中子皮大小与α衰变寿命存在很明显的依赖关系。中子皮大，会减弱发生α衰变的概率，如图4所示[22]。

理论研究发现，中子皮与核表面宽度存在依赖关系[24]。研究中通过改变核势，能够得到原子核不

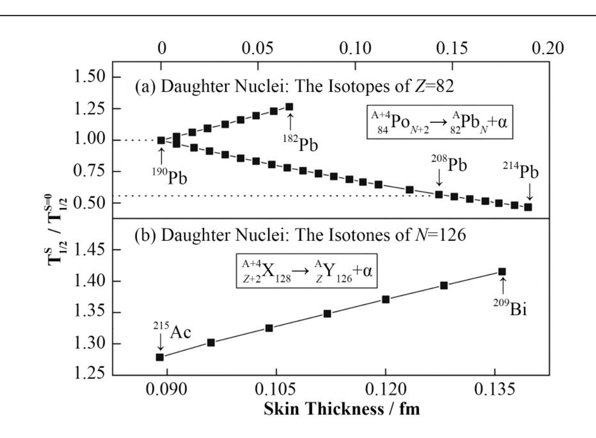


图4 α衰变半衰期与子核的中子皮厚度依赖关系[22]
Fig.4 Dependence between the half-lives of α decay and neutron skin thickness of the daughter nucleus[22]

同的密度分布及中子皮厚度。而基于宏观模型，如液滴模型，密度分布可以用双参数费米分布来描述，进一步研究可以得出中子皮厚度与中子、质子的表面弥散宽度存在关联。因此，通过微观理论计算的密度分布可以得到中子皮，通过中子皮可以反过来确定宏观模型中的核表面弥散宽度。

文献[25]利用HF+BCS理论研究了中子皮与核温度的关系。通过研究非零温的原子核性质，发现温度增加时，质子、中子的半径会增加。随着温度的增高，由于BCS关联，即两个核子的对关联从超流态到正常态转变，发生相变的转变温度正比于对能，大概是对能的0.6倍，为0.6~0.7 MeV。研究发现转变温度以上的中子皮大小会慢慢增加，但是在转变温度处反而是小的。

1.6 在高能重离子碰撞中的中子皮效应

相对论重离子碰撞是核物理的一个重要领域，主要研究高温高密核物质性质[26−27]。近年来，中子皮或形变等原子核结构的效应也成为该领域的一个研究热点[28]。文献[29]通过核子数相同，但是质子和中子数不一样的两个碰撞系统来研究高能重离子碰撞中的中子皮效应。通过采用不同的核势来得到不同的中子皮厚度，基于不同理论模型，如AMPT、UrQMD、Hijing等的研究结果显示[29]，带电粒子多重数产额比与中子皮厚度存在正比关系，表明通过高能重离子碰撞也能对中子皮厚度进行研究。

2 中子晕、中子皮结构的实验探测方法

2.1 不稳定核的产生方法

实验研究中的不稳定核主要通过放射性束流装置来产生[30]。目前世界上产生不稳定核的方法主要有两种：炮弹碎裂法（Projectile Fragmentation，PF）和在线同位素分离法（Isotope Separation On Line，ISOL），示意图如图5所示[31]。炮弹碎裂法是利用重离子加速器产生的稳定核束打靶发生反应，产生各种不同电荷数和质量数的碎片。这些碎片通过后面的次级束流线选择、传输、聚焦到实验终端。炮弹碎裂法的优点是可以产生寿命非常短的不稳定核，包括很多接近中子、质子滴线的次级束流。次级束的能量基本上与炮弹的能量接近，当需要更低的能量，可以通过加降能片将能量降低。在线同位素分离法是通过重离子加速器提供的束流打厚靶，束流能量的大部分甚至是全部损失在靶中。束流与靶反应产生各种粒子，然后通过同位素分离技术把这些能量很低的碎片进行分离和引出。但此时次级束能量很低，当实验需要更高的能量时，可以通过二次加速把次级束的能量提高，再送到实验终端。在线同位素分离法的优点是产生次级束的流强很高，但寿命很短的核素产生比较困难。这两种方法各有优点，技术上可以形成互补的特性。

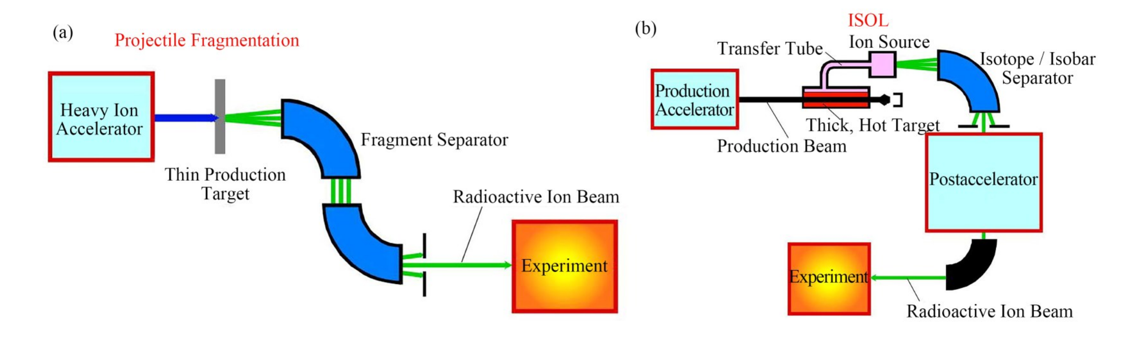


图5 放射性核束产生装置示意图[31] (a) 炮弹碎裂法(PF)，(b) 在线同位素分离法(ISOL)
Fig.5 Schematic of the radioactive nuclear beam production facility[31]
(a) Method of projectile fragmentation, (b) Isotope seperation on line

2.2 晕结构的实验测量方法

具有晕结构的核在很多方面会表现出与稳定核不一样的性质，其中有两个最重要的特征：一个是半径比稳定核要大很多；另一个最外层价核子的动量

分布宽度，比稳定核的要窄很多。在实验上测量核半径有很多方法，特别对长寿命原子核的电荷半径，可以通过电子散射、质子散射、同位素位移等方法测量。在实验上比较常用的方法是通过核反应总截面测量核物质半径。在高能近似下，核反应总截面(σ_R)可以用一个比较简单的公式来表示，即 $\sigma_R=\pi(R_p+R_T)^2$，基本上正比于炮弹和靶半径之和的平方，再乘上π。但实际上核反应总截面与能量是有依赖关系的，理论上有不同的模型可以比较好地描述核反应总截面随能量的变化，如Glauber模型等。

基于核反应总截面公式，由于靶是稳定核，其半径可以认为是知道的，如果实验上测量了 σ_R 就可以根据该公式或理论模型反推出炮弹的核半径或密度分布，这就是核半径的测量原理。具体实验测量中，通常采用透射法[32−33]。当束流穿过靶时，入射粒子的数目(N_0)与穿过靶后未反应的粒子数目(N_1)与靶的厚度(t)及核反应总截面有关，$N_1=N_0\exp(-\sigma_R t)$。将公式反推一下，就可以得到核反应总截面的表达式 $\sigma_R=-\ln(N_1/N_0)/t$。靶厚度是已知的，因此在实验上只需要测量两个计数：一个是入射的粒子数 N_0；一个出射的未反应的粒子数 N_1。实验中，在靶前和靶后设置探测器测量这两个数目，就可以得到核反应总截面。但在实际测量中并没有这么简单，因为入射束流除了与靶反应，与所有探测器也会发生反应。一般通过增加空靶测量来修正入射粒子在探测器中反应而带来的误差。

对于价核子动量分布与密度的关系，从量子力学的波函数来看，动量分布实际上与密度分布互为傅里叶变换。坐标空间的密度分布比较宽时，变换到动量空间会变成一个比较窄的分布。坐标空间的分布比较窄时，变换到动量空间会变成宽的分布。为了实验上测量价核子的动量分布，通常认为有晕或奇异结构的原子核由一个核芯加价核子构成。在炮弹静止系中，核芯的动量与价核子动量大小相等，方向相反。当要测价核子的动量分布时，只需要测量核芯的动量分布。特别对于一些丰中子核，由于价核子是中子，在实验上很难测量，通常测量价中子被剥离之后的核芯的动量分布。实验上通常采用飞行时间法来测量动量分布，即在飞行距离已知的条件下通过测量的飞行时间来确定粒子的速度和动量[32−33]。

2.3 中子皮结构的实验测量方法

测核反应总截面，得到的实际上是一个原子核总的物质半径。要测量中子皮厚度，需要同时知道质子半径和中子半径。在核反应截面中，与质子半径直接相关的是电荷改变截面。通过实验同时测量核反应总截面和电荷改变截面将可以得到核半径和质子半径，从而确定中子皮的厚度[34]。此外，测量中子擦去截面、中子与质子产额比、氚与^{3}He产额比可能也是可行的方法。前面讨论到的与中子皮存在明确依赖关系的都可能用来作为观测量，不过真正要在实验上进行测量，还需要开展更系统的研究，明确每一个物理量对中子皮的敏感程度，只有提取的中子皮厚度精度能达到预期，才是比较理想的实验观测量。通过估算，如中子和质子产额比的测量精度能达到5%，得到的中子皮厚度的精度能到0.1 fm左右[14]。除了中低能核反应中的一些观测量，在高能重离子碰撞中，也希望通过一些探针来探测中子皮厚度。目前高能重离子碰撞基本上只能研究一些稳定核的中子皮。如果将来能够进行不稳定核的高能碰撞，一些高能核物理中比较好的探针也可以用来研究中子皮的结构。

除以上探测中子皮的方法外，目前大家十分关注的是美国杰佛逊(Jefferson)实验室提出来的电子散射中的宇称破坏实验，该实验被认为是基于弱电相互作用的探测方案，能够高精度地把中子皮厚度测量出来。第一个实验的目标是测量^{208}Pb的中子皮，另外还有^{48}Ca的中子皮测量实验。^{208}Pb实验已经做了两期：第一期得到^{208}Pb的中子皮厚度是0.33+(0.16~0.18) fm[35]；第二期的结果为(0.283±0.071) fm[36]。通过最新的^{208}Pb中子皮数据确定核物质状态方程的参数，如对称能斜率参数(L)和饱和密度处对称能(J)的值，与以前的大部分重离子碰撞实验得到的结果差别很大[37]，这个分歧的解释还需更多的实验及理论研究来澄清。

3 结语

相对于稳定核的中子与质子分布半径比较接近而言，中子皮结构是远离稳定线的丰中子核中普遍存在的一种结构特征，其大小与原子核的单粒子轨道、壳层结构随同位旋的演化有十分密切的关系，系统研究中子皮结构对深入理解核力本质具有重要意义。同时，中子皮结构与同位旋非对称核物质的状态方程有密切关系，中子皮的大小与状态方程的很多重要参数都存在明确依赖。通过中子皮可以比较精确地确定或约束对称能等物理量。同时非对称核物质的状态方程又与中子星等一些核天体的性质密切相关。不同的状态方程得到的中子星质量-半径关系不一样。因此中子皮不仅在原子核的结构与反应研究中，同时也在核天体物理研究中是很重要的物理量，是目前核物理的前沿研究热点之一。

作者贡献声明 方德清完成文章所有内容调研及写作。

参考文献

1 核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 中国学科发展战略: 核物理与等离子体物理——学科前沿与发展战略(上册: 核物理卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Writing Group of Development Strategies of Nuclear Physics and Plasma Physics. Development Strategies of China Science Disciplines: Frontier Subjects and Development Strategies of Nuclear Physics and Plasma Physics (Vol. 1: Volume of Nuclear Physics)[M]. Beijing: Science Press, 2017.

2 马余刚. 原子核物理新进展[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.
MA Yugang. Recent progress in nuclear physics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020.

3 Geesaman D, Shepherd M, Lapi S, *et al*. Reaching for the horizon: the 2015 long range plan for nuclear science[Z]. United States, 2015. DOI: https://www.osti.gov/servlets/purl/1296778.

4 Bracco A. The NuPECC long range plan 2017: perspectives in nuclear physics[J]. Nuclear Physics News, 2017, **27**(3): 3 – 4. DOI: 10.1080/10619127.2017.1352311.

5 Centelles M, Roca-Maza X, Viñas X, *et al*. Nuclear symmetry energy probed by neutron skin thickness of nuclei[J]. Physical Review Letters, 2009, **102**(12): 122502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.122502.

6 Wei G F, Huang X, Zhi Q J, *et al*. Effects of the momentum dependence of nuclear symmetry potential on pion observables in Sn+Sn collisions at 270 MeV/nucleon [J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(12): 163. DOI: 10.1007/s41365-022-01146-3.

7 Li B A. Nuclear symmetry energy extracted from laboratory experiments[J]. Nuclear Physics News, 2017, **27**(4): 7 – 11. DOI: 10.1080/10619127.2017.1388681.

8 Li L, Wang F Y, Zhang Y X. Isospin effects on intermediate mass fragments at intermediate energy-heavy ion collisions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(5): 58. DOI: 10.1007/s41365-022-01050-w.

9 Lattimer J M, Prakash M. The equation of state of hot, dense matter and neutron stars[J]. Physics Reports, 2016, **621**: 127 – 164. DOI: 10.1016/j.physrep.2015.12.005.

10 Liu J, Gao C, Wan N, *et al*. Basic quantities of the equation of state in isospin asymmetric nuclear matter[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(11): 117. DOI: 10.1007/s41365-021-00955-2.

11 Fang D Q, Ma Y G, Cai X Z, *et al*. Neutron removal cross section as a measure of neutron skin[J]. Physical Review C, 2010, **81**(4): 047603. DOI: 10.1103/physrevc.81.047603.

12 Fang D Q, Ma Y G, Cai X Z, *et al*. Effects of neutron skin thickness in peripheral nuclear reactions[J]. Chinese Physics Letters, 2011, **28**(10): 102102. DOI: 10.1088/0256-307x/28/10/102102.

13 Aumann T, Bertulani C A, Schindler F, *et al*. Peeling off neutron skins from neutron-rich nuclei: constraints on the symmetry energy from neutron-removal cross sections[J]. Physical Review Letters, 2017, **119**(26): 262501. DOI: 10.1103/physrevlett.119.262501.

14 Sun X Y, Fang D Q, Ma Y G, *et al*. Neutron/proton ratio of nucleon emissions as a probe of neutron skin[J]. Physics Letters B, 2010, **682**(4 – 5): 396 – 400. DOI: 10.1016/j.physletb.2009.11.031.

15 Dai Z T, Fang D Q, Ma Y G, *et al*. Triton/^{3}He ratio as an observable for neutron-skin thickness[J]. Physical Review C, 2014, **89**(1): 014613. DOI: 10.1103/physrevc.89.014613.

16 Dai Z T, Fang D Q, Ma Y G, *et al*. Effect of neutron skin thickness on projectile fragmentation[J]. Physical Review C, 2015, **91**(3): 034618. DOI: 10.1103/physrevc.91.034618.

17 Bertulani C A, Valencia J. Neutron skins as laboratory constraints on properties of neutron stars and on what we can learn from heavy ion fragmentation reactions[J]. Physical Review C, 2019, **100**(1): 015802. DOI: 10.1103/physrevc.100.015802.

18 Wei H L, Zhu X, Yuan C. Configurational information entropy analysis of fragment mass cross distributions to determine the neutron skin thickness of projectile nuclei [J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(9): 111. DOI: 10.1007/s41365-022-01096-w.

19 Ma C W, Liu Y P, Wei H L, *et al*. Determination of neutron-skin thickness using configurational information entropy[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(1): 6. DOI: 10.1007/s41365-022-00997-0.

20 Wang S S, Ma Y G, Fang D Q, *et al*. Effects of neutron-skin thickness on direct hard photon emission from reactions induced by the neutron-rich projectile ^{50}Ca[J]. Physical Review C, 2022, **105**(3): 034616. DOI: 10.1103/

physrevc.105.034616.

21 Zhao Q, Suzuki Y, He J, *et al*. α clustering and neutron-skin thickness of carbon isotopes[J]. The European Physical Journal A, 2021, **57**(5): 157. DOI: 10.1140/epja/s10050-021-00465-0.

22 Wan N, Xu C, Ren Z Z. Exploring the sensitivity of α-decay half-life to neutron skin thickness for nuclei around ^{208}Pb[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(2): 22. DOI: 10.1007/s41365-016-0174-7.

23 Seif W M, Antonenko N V, Adamian G G, *et al*. Correlation between observed α decays and changes in neutron or proton skins from parent to daughter nuclei[J]. Physical Review C, 2017, **96**(5): 054328. DOI: 10.1103/physrevc.96.054328.

24 Horiuchi W, Ebata S, Iida K. Neutron-skin thickness determines the surface tension of a compressible nuclear droplet[J]. Physical Review C, 2017, **96**(3): 035804. DOI: 10.1103/PhysRevC.96.035804.

25 Yüksel E, Khan E, Bozkurt K, *et al*. Effect of temperature on the effective mass and the neutron skin of nuclei[J]. The European Physical Journal A, 2014, **50**(10): 160. DOI: 10.1140/epja/i2014-14160-4.

26 Wang X N. Vector meson spin alignment by the strong force field[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 15. DOI: 10.1007/s41365-023-01166-7.

27 Ma Y G. New type of double-slit interference experiment at Fermi scale[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 16. DOI: 10.1007/s41365-023-01167-6.

28 Ma Y G, Zhang S. Influence of nuclear structure in relativistic heavy-ion collisions[M]//Handbook of Nuclear Physics. Singapore: Springer, 2022: 1–30. DOI: 10.1007/978-981-15-8818-1_5-1.

29 Li H, Xu H J, Zhou Y, *et al*. Probing the neutron skin with ultrarelativistic isobaric collisions[J]. Physical Review Letters, 2020, **125**(22): 222301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.222301.

30 Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, *et al*. RIBLL, the radioactive ion beam line in Lanzhou[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **503**(3): 496–503. DOI: 10.1016/s0168-9002(03)01005-2.

31 Casten R F. Scientific opportunities with an advanced ISOL facility[J]. Nuclear Physics News, 1998, **8**(3): 25–26. DOI: 10.1080/10506899809410876.

32 Fang D Q, Yamaguchi T, Zheng T, *et al*. One-neutron halo structure in ^{15}C[J]. Physical Review C, 2004, **69**(3): 034613. DOI: 10.1103/physrevc.69.034613.

33 Fang D Q, Guo W, Ma C W, *et al*. Examining the exotic structure of the proton-rich nucleus ^{23}Al[J]. Physical Review C, 2007, **76**(3): 031601. DOI: 10.1103/physrevc.76.031601.

34 Li X F, Fang D Q, Ma Y G. Determination of the neutron skin thickness from interaction cross section and charge-changing cross section for B, C, N, O, F isotopes[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, **27**(3): 71. DOI: 10.1007/s41365-016-0064-z.

35 Abrahamyan S, Ahmed Z, Albataine H, *et al*. Measurement of the neutron radius of ^{208}Pb through parity violation in electron scattering[J]. Physical Review Letters, 2012, **108**(11): 112502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.112502.

36 Adhikari D, Albataineh H, Androic D, *et al*. Accurate determination of the neutron skin thickness of ^{208}Pb through parity-violation in electron scattering[J]. Physical Review Letters, 2021, **126**(17): 172502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.172502.

37 Reed B T, Fattoyev F J, Horowitz C J, *et al*. Implications of PREX-2 on the equation of state of neutron-rich matter[J]. Physical Review Letters, 2021, **126**(17): 172503. DOI: 10.1103/physrevlett.126.172503.